

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ**  
**«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**  
**ФАКУЛЬТЕТ ЕЛЕКТРОНІКИ**  
**КАФЕДРА АКУСТИЧНИХ ТА МУЛЬТИМЕДІЙНИХ СИСТЕМ**

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри



(підпис)

Найда С.А.

(ініціали, прізвище)

“01” червня 2020 р.

**Дипломна робота**

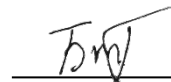
на здобуття ступеня бакалавра

зі спеціальності (спеціалізації) 171 «Електроніка»

на тему: Акустична система виявлення і локалізації малих літальних апаратів

Виконав: студент 4 курсу, групи ДГ-г61-1

Букар Григорій Миколайович



Керівник доцент кафедри АМЕС, доц., к.ф.-м.н., Козерук С.О.



Консультант

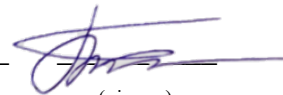
(назва розділу)

(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище, ініціали)

(підпис)

Рецензент Професор каф ЕІ, доц, д.т.н ., Прокопенко Ю.В.

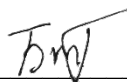
(посада, науковий ступінь, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)



(підпис)

Засвідчую, що у цій дипломній роботі немає  
запозичень з праць інших авторів без відповідних  
посилань.

Студент



(підпис)

Київ – 2020 року

**Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**

Факультет електроніки

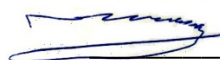
Кафедра акустичних та мультимедійних систем

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Спеціальність (спеціалізація) 171 «Електроніка»

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

Завідувач кафедри



Найда С.А.

(підпис)

(ініціали, прізвище)

“01” червня 2020 р.

**ЗАВДАННЯ**

**на дипломний проект (роботу) студенту**

Букару Григорію Миколайовичу

1. Тема проекту (роботи): Акустична система виявлення і локалізації малих літальних апаратів

керівник роботи: доцент кафедри АМЕС, доц., к.ф-м.н., Козерук С.О.,

затверджені наказом по університету від «\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ р. № \_\_\_\_\_

2. Строк подання студентом проекту (роботи) \_\_\_\_\_

3. Вихідні дані до проекту (роботи): Рівень випромінювання літального апарата не перевищує 80дБ ,завада в зоні спостереження - 50дБ.

4. Зміст (дипломної роботи) пояснювальної записки (перелік завдань, які потрібно розробити): Аналітичний огляд поставленої задачі по літературним джерелам. Встановлення акустичних характеристик випромінювання літальних апаратів. Обґрунтування методів локалізації за акустичним випромінюванням. Комп'ютерне моделювання кореляційного пеленгатора.

5. Перелік графічного (ілюстративного) матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслеників, плакатів, презентацій тощо): презентація в Power Point

## 6. Консультанти розділів проекту (роботи)\*

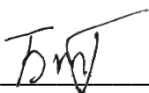
Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

7. Дата видачі завдання \_\_\_\_\_

## Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломного проекту (роботи)	Строк виконання етапів проекту (роботи)	Примітка
1.	Огляд інформаційних джерел .	15.04.20	Виконав
2	Визначення акустичних характеристик випромінювання .	20.04.20	Виконав
3	Аналіз топографічних методів розрахунку координат об'єкта	25.04.20.	Виконав
4	Обґрунтування методу кореляційного пеленгування	05.05.20	Виконав
5	Комп'ютерне моделювання кореляційного пеленгатора	15.05.20	Виконав
7	Проведення модельного експерименту	24.05.20	Виконав
8	Висновки	25.05.20	Виконав
9	Оформлення роботи	05.06.20	Виконав

Студент



Букар Г.М.

Керівник проекту (роботи)



Козерук С.О.

\* Консультантом не може бути зазначено керівника дипломного проекту (роботи)

## АНОТАЦІЯ

Дипломна робота містить основну частину на 30 аркушах, 17 ілюстрацій та 1 таблицю. Метою роботи є розробка акустичної системи пеленгування безпілотних літальних апаратів. В роботі проведено аналітичний огляд літератури, встановлені акустичні характеристики випромінювання, вибрано тріангуляційний спосіб локалізації безпілотних літальних апаратів. Для визначення пеленгів запропоновано використати кореляційний метод. Комп'ютерне моделювання кореляційного пеленгатора дало змогу визначити відношення сигнал/завада для забезпечення достовірного виявлення.

Ключові слова: *безпілотний літальний апарат, акустичне випромінювання, тріангуляційний метод локалізації, кореляційний пеленгатор*

## ANNOTATION

Thesis contains the bulk of the 30 pages, 17 illustrations and 1 table.

The aim of the work is to develop an acoustic guidance system for unmanned aerial vehicles. The analytical review of the literature is carried out, the acoustic characteristics of radiation are established, the triangulation method of localization of unmanned aerial vehicles is chosen. It is proposed to use the correlation method to determine the bearings. Computer simulation of the correlation direction finder made it possible to determine the signal-to-noise ratio to ensure reliable detection.

Keywords: unmanned aerial vehicle, acoustic radiation, triangulation localization method, correlation direction finder

## ЗМІСТ

<b>ВСТУП.....</b>	<b>8</b>
<b>РОЗДІЛ 1. АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД ПОСТАВЛЕНОЇ ЗАДАЧІ .....</b>	<b>9</b>
1.1. Безпілотні літальні засоби. Короткий огляд та технічні характеристики. 9	
1.2. Акустичні характеристики БПЛА.....	16
1.3. Пристрої акустичного пеленгування та їх технічні характеристики .....	19
1.4. Топографічні методи визначення координат.....	23
1.5 Висновки по розділу.....	26
<b>РОЗДІЛ 2. РОЗРАХУНКОВА ЧАСТИНА.....</b>	<b>27</b>
2.1. Опис методу локалізації БПЛА.....	27
2.2. Застосування кореляційного методу пеленгування.....	28
2.3 Комп'ютерне моделювання кореляційного пеленгатора.....	32
2.4 Модельний експеримент.....	33
2.5. Висновки по розділу.....	36
<b>ВИСНОВКИ.....</b>	<b>37</b>
<b>ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ.....</b>	<b>38</b>

## СПИСОК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

БПЛА – безпілотний літальний апарат

КПХ – кут приходу хвиль

КП – кореляційний пеленгатор

ВКФ – взаємна кореляційна функція

КФ – кореляційна функція

М – мікрофон

СФ – смуговий фільтр

ЛЗ – ланцюг затримки

ПР – перемножувач

ІН – інтегратор

ППР – пристрій прийняття рішень

ІМ – імітаційна модель

## ВСТУП

Проблема виявлення безпілотних літальних апаратів (БПЛА), в першу чергу, пов'язана з захистом приватної власності та здоров'я громадян. Останнім часом кількість БПЛА збільшується швидкими темпами. За деякими розрахунками кількість БПЛА тільки в США до кінця 2025 року буде становити більше 30000 одиниць. Останнім часом більш популярними стали літальні апарати з декількома електричними двигунами. Ці авіаційні системи, як правило, прості в управлінні та мають можливість вертикального зльоту та посадки, зависання та швидкого маневру в просторі. Тому актуальними є системи моніторингу за повітряним простором пристроями та системами різного принципу функціонування. Пристрої мають різний фізичний принцип дії тому мають як переваги так і недоліки. Оптичні камери спостереження, доступні по ціні і прості в експлуатації, не можуть функціонувати в складних метеорологічних умовах і вночі. Використання пристроїв інфрачервоного і радіочастотного спостереження обмежене низьким тепловим і електромагнітним випроміненням БПЛА. Активні системи радіолокації можуть працювати без значного погіршення в негоду, вдень і вночі, забезпечувати виявлення на відстані до декількох кілометрів. Головні недоліки – відсутність скритності спостереження, велика тривалість часу сканування довкілля та необхідність великої бази радіолокаційних знімків для класифікації авіаційних об'єктів.

Акустичні пасивні пристрої спостереження, відносно недорогі і прості в експлуатації. Вони використовують пасивні методи виявлення і локалізації джерел звуку. Недоліком таких пристроїв є відносно невелика відстань виявлення. Тому пристрої набираються в системи акустичного моніторингу. Розробка систем для виявлення і локалізації малих літальних апаратів є актуальною і економічно доцільною.

Метою роботи є створення системи моніторингу на основі пасивних акустичних методів локалізації БПЛА.



## РОЗДІЛ 1. АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД ПОСТАВЛЕНОЇ ЗАДАЧІ

### 1.1. Безпілотні літальні засоби. Короткий огляд та технічні характеристики.

За сучасним визначенням з роботи [1], «безпілотником» є той апарат, який знаходиться під постійним дистанційним контролем пілота або ж пілотів і призначений для повернення на аеродром для подальшого повторного використання.

В роботі [2] можна підкреслити основні ознаки БПЛА:

- За способом керування:

1. Дистанційно керовані. Керування польотом відбувається у двох режимах:

- ручне керування, відбувається за рахунок керування оператора безпілотного літального апарату в режимі реального часу;
- автоматизоване керування відбувається автономно, з можливістю його корегування. Попередньо вводять координати точок маршруту, визначаючи положення літального апарату в даний момент часу за допомогою навігації.

2. Автоматичні. Керування здійснюється автопілотом по заздалегідь заданій траєкторії на заданій висоті з заданою швидкістю і з стабілізацією кутів орієнтації.

Найбільш розповсюдженим на сьогоднішній день є дистанційно-керовані БПЛА, що дозволяє в режимі реального часу проводити дослідження необхідної місцевості та об'єктів. Оператор з землі керує безпілотним літальним апаратом, або вносить зміни в заданому маршруті. Але з точки зору захисту від завад спричинених електромагнітним впливом він є найбільш вразливим.

- За типом конструкції:

1. Безпілотні літальні апарати фіксованого крила – це безпілотні літаки, котрі використовують прямий поштовх, щоб отримати підйомну силу. Вони потребують відносно високої пускової швидкості, щоб отримати цю підйомну силу, тому не підходять для роботи в обмеженому чи небезпечному навколишньому середовищі.
2. Безпілотні апарати з крилом, що обертається
  - одногвинтові – ці схеми використовуються для побудови вертольотів. Вони зазвичай використовують привідний несучий гвинт, що забезпечує підйомну силу, що врівноважується хвостовим рульовим гвинтом;
  - багатогвинтові (мультикоптер) – мають більше двох несучих гвинтів для керування всіма формами руху.

- Розподіл за розміром та масою зображено в таблиці 1.1.

Табл. 1.1. Класифікація БПЛА за розмірами та масою

Класифікація	Категорія	Взлітна маса [кг]	Висота польоту [м]	Час польоту [год]
Мікро та міні	Мікро	0.1	250	1
	Міні	30	150-300	2
Тактичні	Близької відстані	150	3000	2-4
	Середнього діапазону	150-500	3000-5000	6-10
	Дальнього діапазону	150-500	5000	9-13
	Високовитривалі	2500-12500	15000-20000	24-48
Стратегічні	Смертоносний	250	3000-4000	3-5
Спеціального призначення	Приманка	250	50-5000	4
	Стратосферний	-	20000-30000	48

- Застосування безпілотних літальних апаратів:

1. Транспортування - доставка вантажів різних габаритів без пілота у автономному варіанті по запрограмованому маршруту.
2. Аерофотозйомка - аерофотозйомка місцевості з стратегічною, дослідницькою або художньою цілями.
3. Забезпечення безпеки - охорона об'єктів і людей: моніторинг стратегічно важливих об'єктів. У надзвичайних ситуаціях: попередження при виникненні НС, виконання рятівних та пошукових робіт, радіаційний контроль місцевості.
4. Військова сфера - розвідувальні безпілотні літальні апарати мінімальних розмірів, здатні непомітно проникати на об'єкти супротивника.
5. Впровадження безпроводних телекомунікаційних систем
6. Екологічний контроль і керування повітряним рухом

Короткий огляд технічних характеристик деяких апаратів:

«Spectator-M1» — український безпілотний авіаційний комплекс, призначений для розвідки див. роботу [3]. Комплекс розроблявся студентами Київського політехнічного інституту.

Тактико-технічні характеристики:

- Призначення — здійснення повітряної розвідки
- Практична стеля застосування — 3000 м
- Швидкість — 120 км/год
- Тривалість безперервного польоту — 3 год
- Дальність передачі відеозображення — 35 км
- Максимальний маршрут польоту — 200 км

Судячи зі статті [4] «Spectator-M1» має меншу вагу і збільшену тривалість польоту, а гарантована дальність передачі відеосигналу відтепер становить 35 км. Також комплекс обладнано новою наземною станцією управління. Зменшено шумність електродвигуна БПЛА, при тому що діюча модель є найтихішою в своєму класі.

Комплекс устатковується цифровою відеокамерою та тепловізором зі збільшеними кутами огляду. Завдяки захищеним каналам зв'язку, БПЛА може проникати у повітряний простір, що охороняється ворожими системами радіоелектронної боротьби, здійснювати розвідку і передавати відео-зображення та координати.



Рис. 1.1. Серійний зразок Spectator-M1

RQ-11 Raven — малий розвідувальний БПЛА виробництва американського підприємства AeroVironment Inc. RQ-11 може запускатись з руки й не потребує підготовленого майданчика для приземлення див. роботу [5]. Апарат почав

випускатися в початку двохтисячних і здобув велику популярність в військовій сфері. Нині апарат присутній на озброєнні в більш ніж десяти країнах світу.

Тактико-технічні характеристики:

- Розмах крил: 1,372 м
- Маса: 1,9 кг
- Крейсерська швидкість: 56 км/год
- Висота польоту: до 5000 м
- Радіус дії: 10 км
- Тип двигуна: електричний (Engine Aveox 27/26/7-AV)
- Довжина: 0,915 м
- Тривалість польоту: 60...90 хв.



Рис. 1.2. БПЛА RQ-11 Raven на демонстрації



DJI Mavic Pro — це любительський квадрокоптер з чотирма гвинтами) китайської компанії DJI, представлений 27 вересня 2016 року. Його відмінною особливістю див. статтю [6] є невеликий розмір в складеному стані, що дозволяє переносити Mavic у фотосумці. Пристрій може бути пілотований за допомогою програм для iPhone/iPod/iPad або Android-пристроїв і здатною знімати відео на вбудовану камеру в 4K ( $3840 \times 2160$  пікселів).

Тактико-технічні характеристики:

- Діаметр: 0,335 м
- Маса: 0,734 кг
- Максимальна швидкість: 65 км/год
- Дистанція польоту: 13 км
- Тривалість польоту: 21...27 хв.



Рис. 1.3. DJI Mavic Pro в польоті

Окремої уваги заслуговує пульт управління, який теж має досить компактні розміри. На вбудованому екрані відображається основна інформація, з допомогою



## 1.2. Акустичні характеристики БПЛА

В роботі [7] можна підкреслити, що в вимірних шумах всіх чотирьох дронів переважають шуми, пов'язані з пропелером, включаючи широкосмуговий шум і вузькосмуговий детермінований шум. На рисунку 1.4 зображені спектральні характеристики звукового тиску чотирьох апаратів.

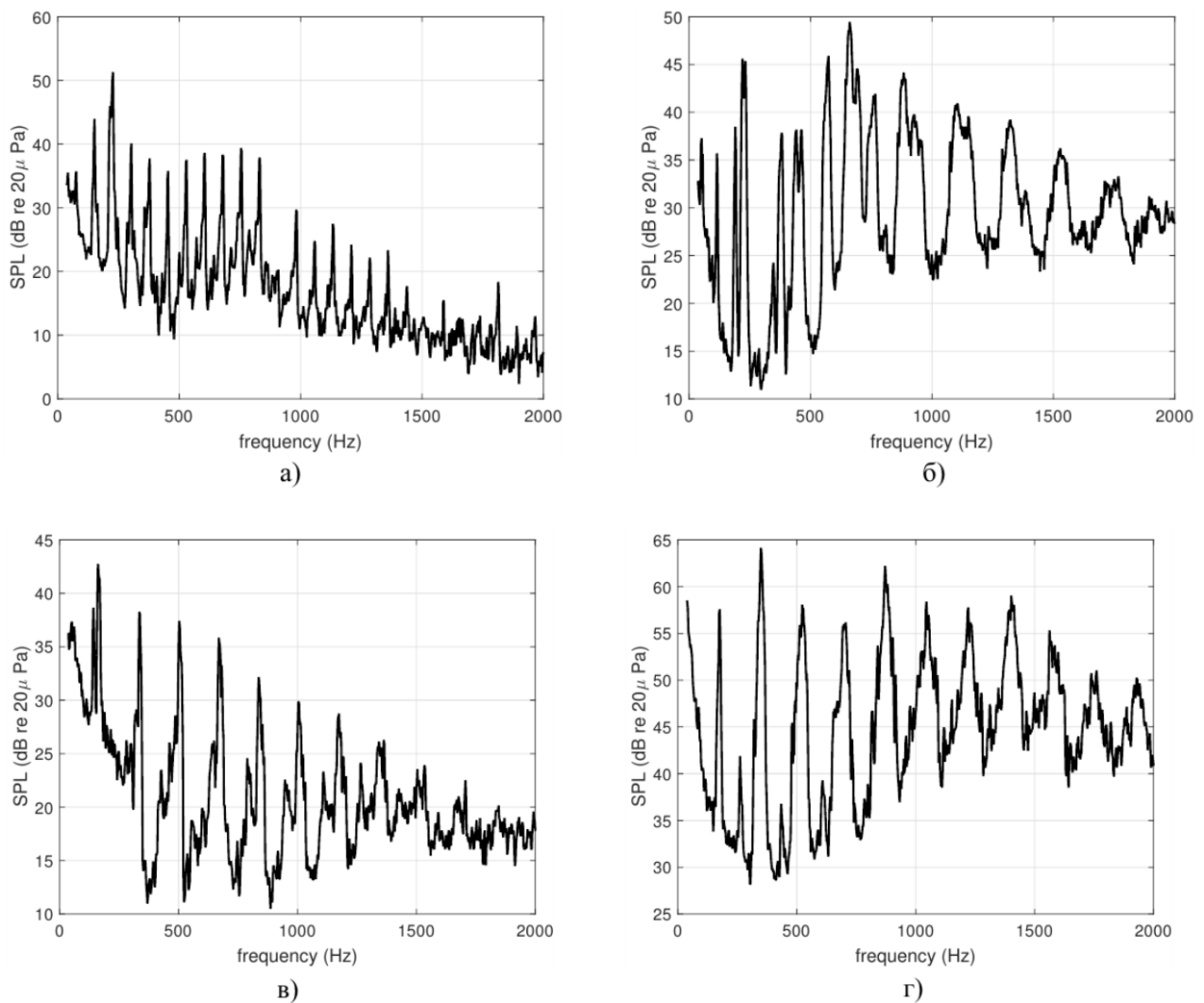


Рис.1.4. Приклади спектрів БПЛА:

а) фіксоване крило б) квадрокоптер; в) трикоптер; г) гексакоптер.



Спектр акустичного випромінювання при роботі однороторного БПЛА на рисунку 1.7.

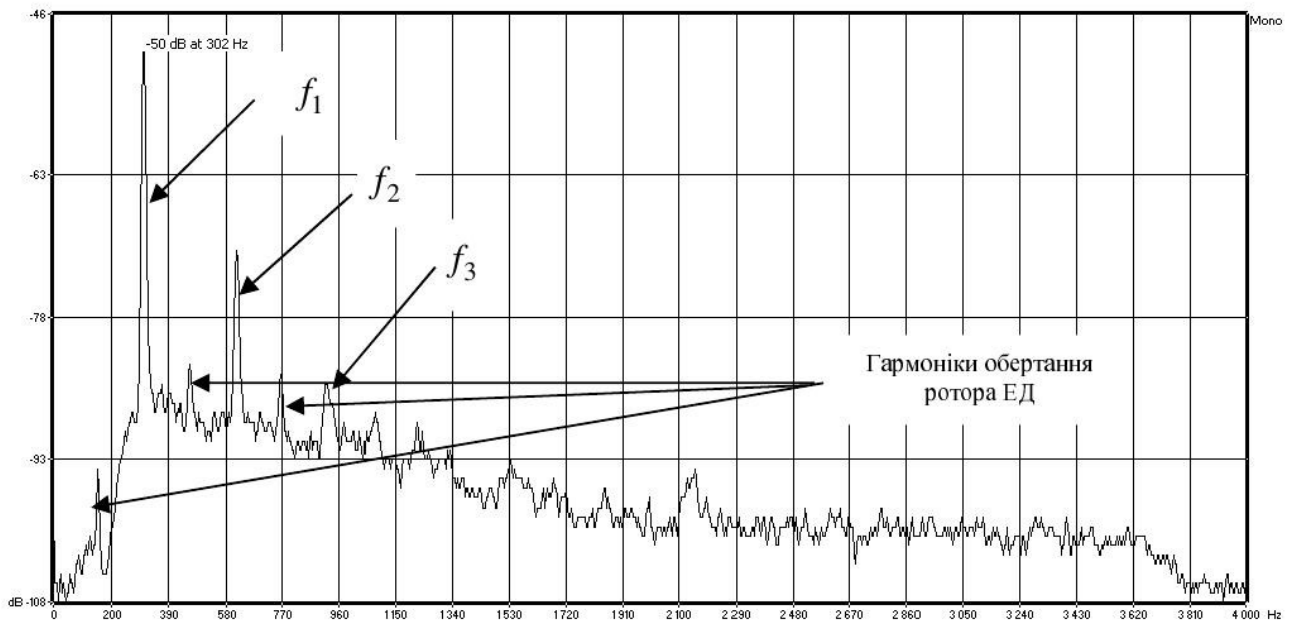


Рис.1.7. Акустичний спектр випромінювання при роботі однороторного електричного двигуна (частота обертання гвинта - 9000 об/хв)

Наведений спектр містить дискретні складові, максимуми обвідних розміщені на області 300-900 Гц, тобто в районах перших трьох гармонік. Оскільки перша гармоніка розміщена на частоті 300 Гц, а всі наступні ідуть на кратних для неї частотах, то напрашується висновок, що акустичний портрет матиме гармоніки на частотах, кратних частоті обертання двигуна.

В роботі [8] більш детально описуються акустичні характеристики БПЛА. Звук пропелера залежить від частоти обертання ротора двигуна та кількості лопатей на його осі. Спектр випромінювання періодичний, має явно виражені дискрети, частота яких змінюється в залежності від кількості обертів двигуна. Частоти  $f_i$  максимумів спектру можна оцінити знаючи частоту обертання електродвигуна  $f_0$  та кількість лопатей  $N$  пропелера:  $f_i = N f_0 i$ ;  $i = 1, 2, 3 \dots$  Спектр БПЛА має декілька близьких дискрет, положення яких на осі частот змінюється у часі. Пояснюється це тим, що двигуни обертаються з різною

швидкістю, котра залежить від режиму польоту та дії «тиску вітру». У польоті вітрове навантаження на пропелери змінюється постійно. Величина та частота звукового випромінювання змінюються теж випадково та може розглядатись як широкопasmовий шумовий процес з гармонічними компонентами.

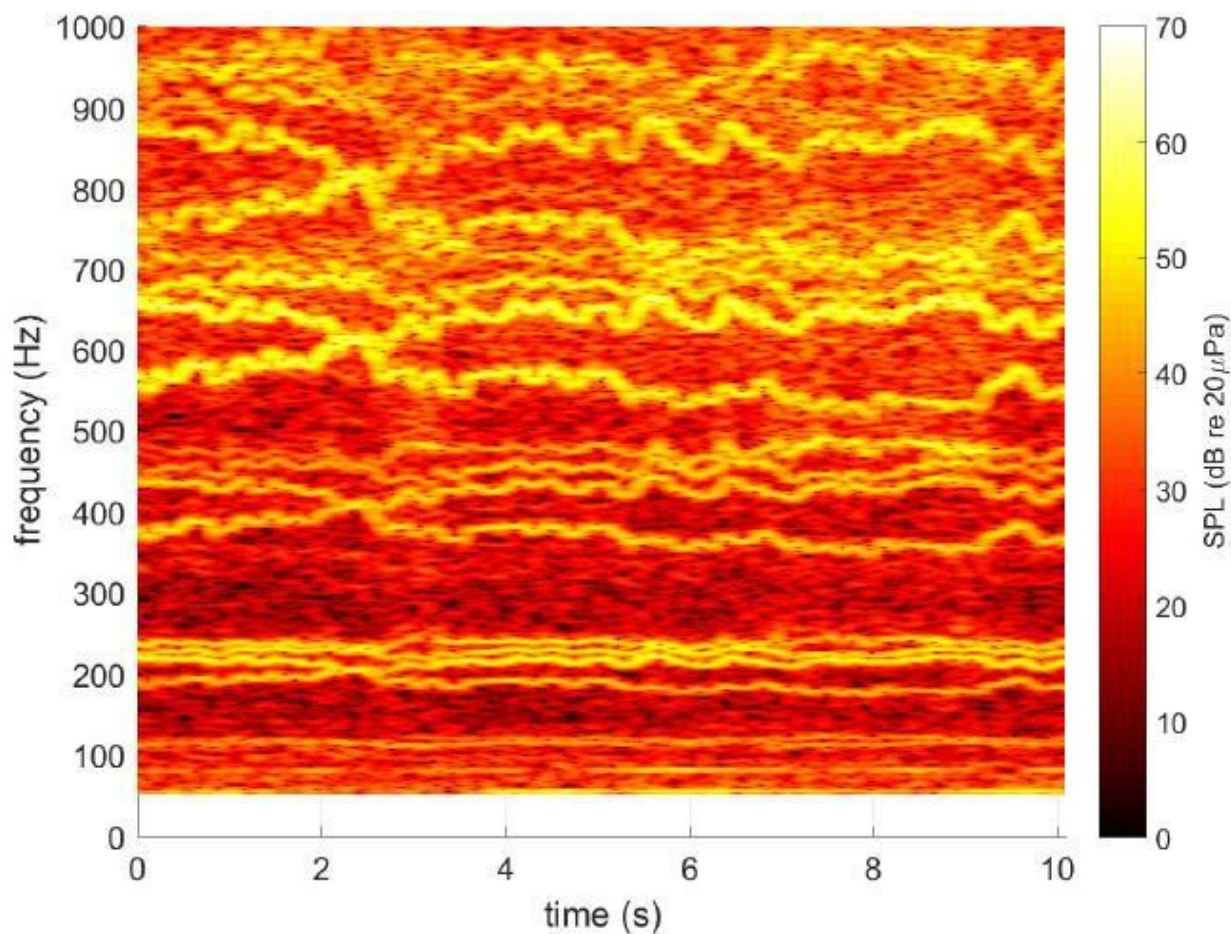


Рис.1.5. Спектрограма прогонів квадрокоптера на швидкості 6 м/с

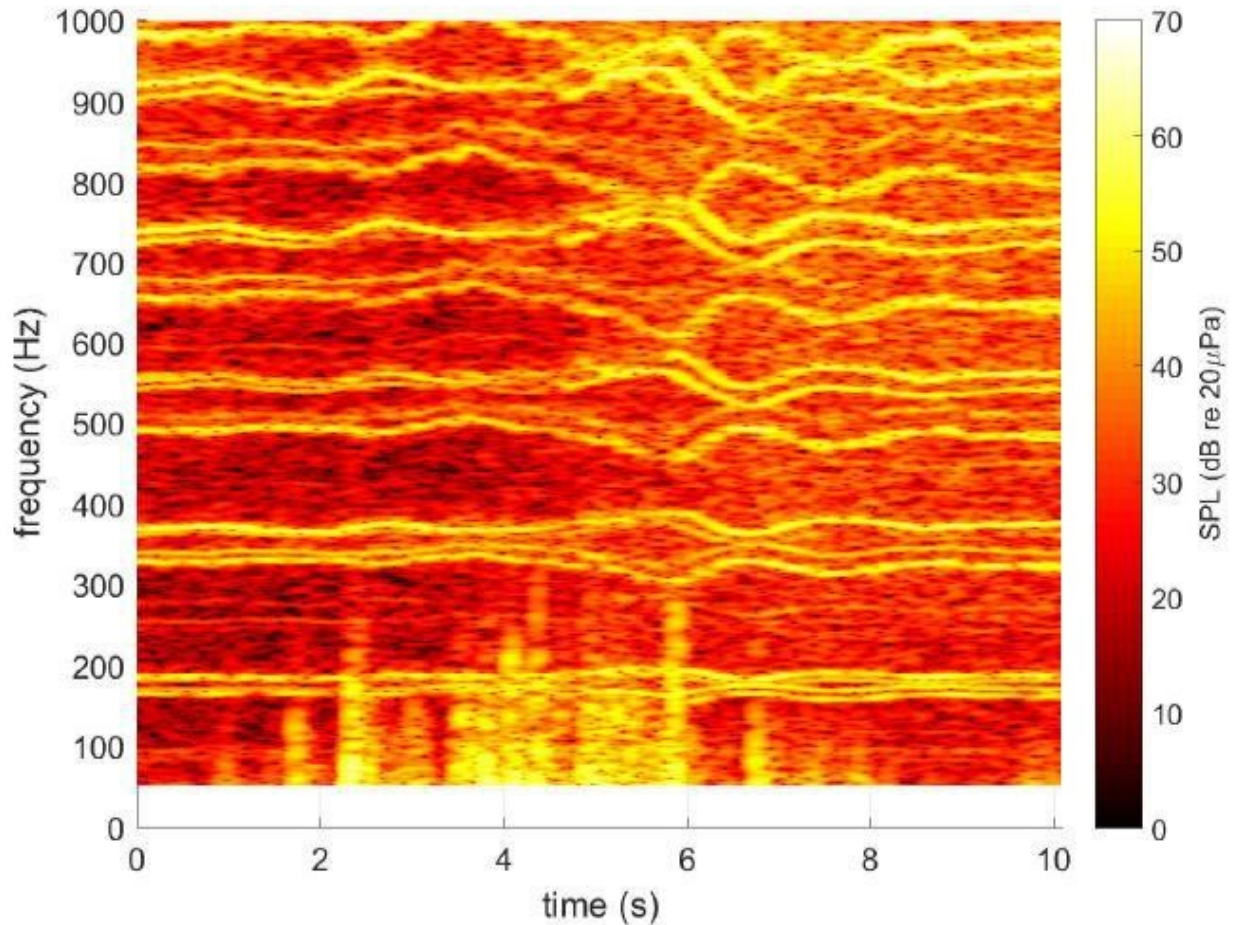


Рис.1.6 Спектрограма прогонів гексакоптера на швидкості 13 м/с

На малюнку 1.5 та 1.6 показані спектрограми для квадрокоптера і гексакоптера. На спектрограмах досить чітко відображаються тони, рівень широкопasmового шуму дещо нижче тонів, за винятком точки найбільшого наближення, яка сталася приблизно на сьомій секунді на обох графіках.

### 1.3. Пристрої акустичного пеленгування та їх технічні характеристики

Акустичні пеленгатори які випускаються промислово умовно поділяються на детектори, що діють на невеликій відстані, та системи акустичної моніторингу. Розглянемо деякі із них.

Французька фірма ORELIA розробила систему пеленгування «Drone Detector», система складається з акустичного датчика[9] та програмного забезпечення для моніторингу захищеного об'єкта, відстеження цілей та налаштування датчиків див. рис.1.8.



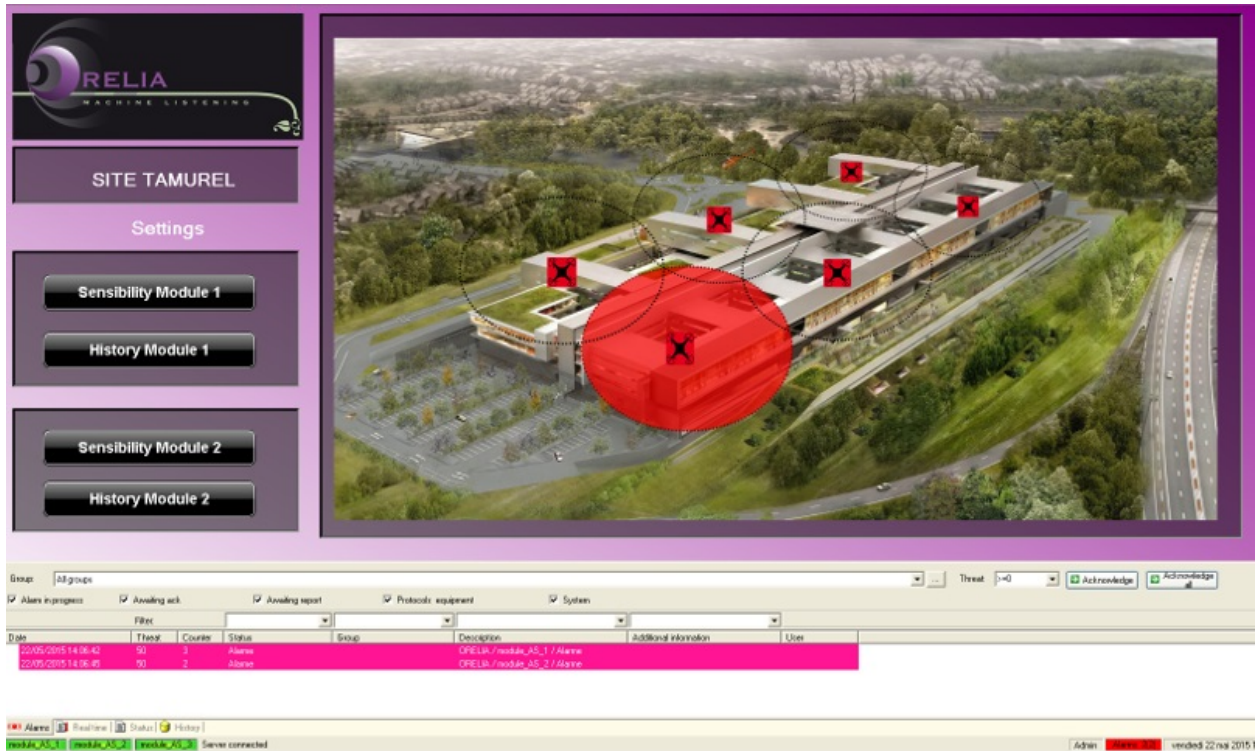
Рис.1.8. Drone Detector від фірми ORELIA

Система має наступні характеристики:

- забезпечення водонепроникності;
- діапазон живлення: 7 – 18 В;
- споживана потужність: 5 Вт;
- температура використання: від -10 ° С до + 50 ° С (поч. точка при 0 °С);
- поставляється з конвертером 220V AC/18V DC;
- вага: 1,5 кг;
- матеріал: алюміній.
- кут обхвату горизонту: 360 градусів
- дальність дії: до 100 м.



Розгортання системи датчиків дозволяє сформувати акустичний бар'єр і, таким чином локалізувати БПЛА на основі обраної геометрії бар'єру.



### 1.9. Програмне забезпечення фірми ORELIA

Міжнародна компанія Droneshield постачає декілька акустичних систем виявлення. Одна з них – Droneshield Drone Sentry див. рис. 1.10. Дана система інтегрує набір датчиків і контрзаходів DroneShield в єдину платформу, розраховану на тимчасове та постійне встановлення[10].



Рис.1.10. Drone Shield Far Alert Sensor

Переваги даної системи:

- Комплексне рішення для виявлення
- Модульна конструкція дозволяє ефективно транспортувати пристрій та швидко його встановлювати
- Стійкість до погодних умов і продуманий дизайн захищає технологію в суворих умовах
- Ефективний радіус роботи 1-2 км.
- Оповіщення по електронній пошті та SMS, інтеграція через XML /JSON

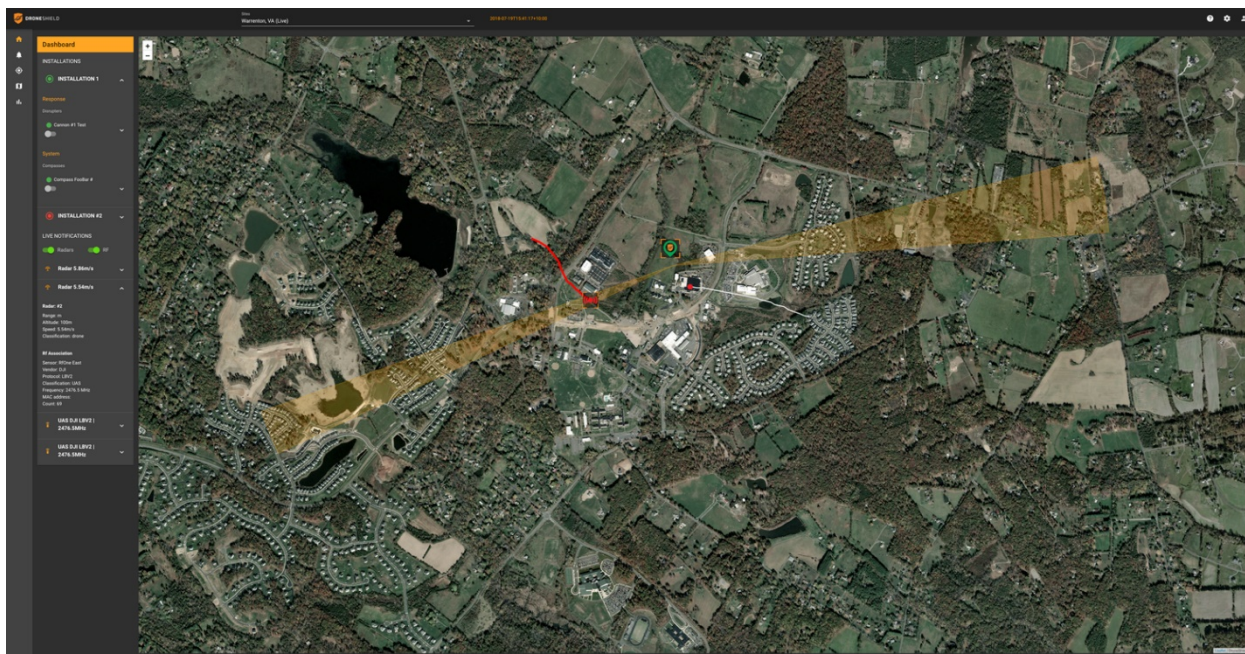


Рис. 1.11. Діалогове вікно для взаємодії компанії Dronesshield

В зарубіжних країнах широко використовують комплексні системи, що дозволяють вести розвідку і спостереження в будь-який час доби і при будь-якій погоді.

#### 1.4. Топографічні методи визначення координат

Історично топографічні методи були розроблені вирішення задач радіолокації, топографії та геодезії. В подальшому їх удосконалили для визначення координат джерел акустичного випромінювання з допомогою пасивних і активних методів радіолокації.

Пасивний метод відрізняється використанням власного випромінювання цілей. Оскільки відстань до цілі не може бути визначена за даними випромінювання, отриманими тільки з однієї точки спостереження, то для знаходження джерела випромінювання прийнято використовувати кілька рознесених точок, з'єднаних каналами зв'язку. Особливостями таких систем є:

- Прихованість роботи за рахунок відсутності власного випромінювання

- Система багатопозиційна. Пояснюється тим, що з допомогою тільки одного пункту прийому можна визначити тільки кутові координати цілі, але не відстань до неї.
- Система складається з сукупності взаємозалежних приймачів, спільна робота яких дозволяє визначити просторові координати цілі та відсіяти хибні джерела випромінювання

Прийом прямого сигналу спрощує виявлення джерела випромінювання, але з іншого боку відсутність інформації про сигнал і наявність інших джерел випромінювань ускладнюють задачу виявлення.

Тріангуляційний метод описаний в роботі [11] та полягає у вимірюванні кутових напрямків до об'єкту як мінімум з двох точок прийому, рознесених на деяку відстань( $D$ ) яку називають базою. Якщо джерело випромінювання розташоване в горизонтальній (або вертикальній) площині, як показано на рис. 1.12., досить виміряти два азимути  $\beta_1$  і  $\beta_2$  (при потребі і кути місця  $\varepsilon_1$  і  $\varepsilon_2$ ). Знаходження об'єкту буде з'ясовано по перетину двох ліній, які називаються лініями положення.

При визначенні просторових координат джерела випромінювання досить виміряти азимути  $\beta_1$  і  $\beta_2$  в двох точках і кут місця  $\varepsilon_1$  в одній, або, навпаки, - кути місця  $\varepsilon_1$  і  $\varepsilon_2$  в двох точках і азимут  $\beta_1$  - в одній.

Положення джерела випромінювання буде дорівнювати точці, в якій перетинаються два промені, що виходять з точок  $O$  і  $A$ . Дальність до джерела розраховується за вимірюються кутів і відомої базі  $D$ :

$$r \cdot \cos \varepsilon_1 \cdot \cos \varepsilon_2 + r_A \cdot \cos \varepsilon_2 \cdot \cos (180 - \beta_2) = D_1 + D_2 = D \quad (1.1)$$

$$r \cdot \cos \varepsilon_1 \cdot \sin \beta_1 = r_A \cdot \cos \varepsilon_2 \cdot \cos (180 - \beta_2) = h \quad (1.2)$$

$$r_A \cdot \cos \varepsilon_2 = \frac{r \cdot \cos \varepsilon_1 \cdot \sin \beta_1}{\sin (180 - \beta_2)} \quad (1.3)$$



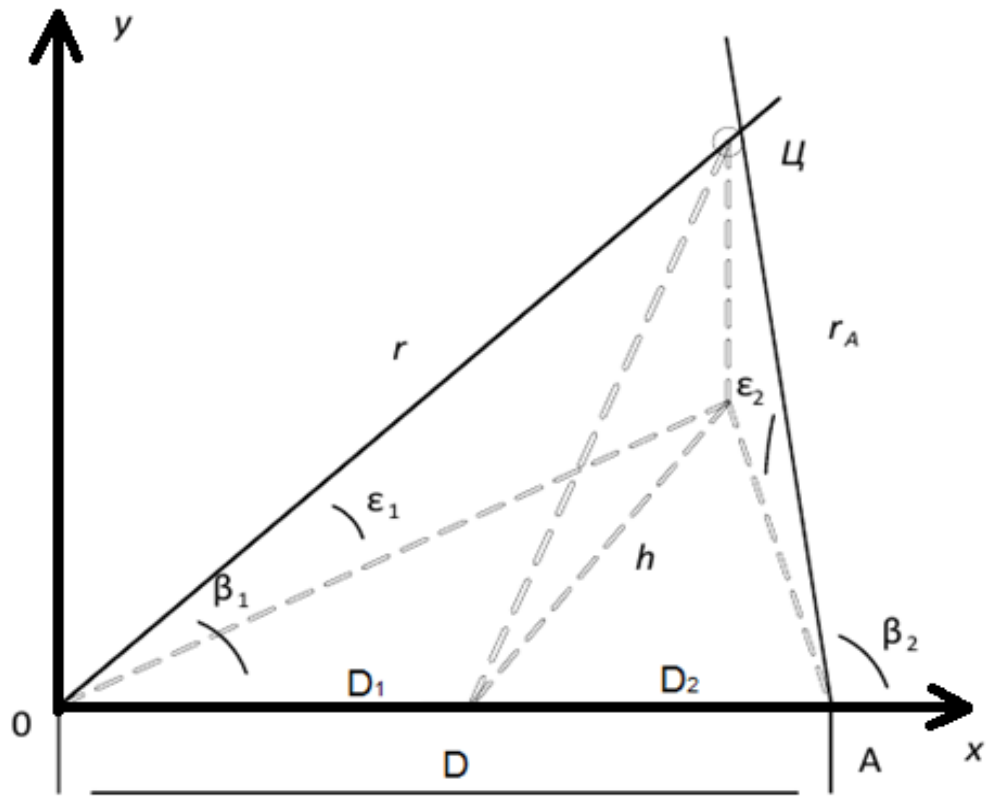


Рис. 1.12. Схема триангуляційного методу

Підставимо замість  $r_A \cos \varepsilon_2$  його значення в рівняння і врахуємо, що:

$$\frac{\cos (180 - \beta_2)}{\sin (180 - \beta_2)} = -\operatorname{ctg} \beta_2 \quad (1.4)$$

В результаті отримаємо, що:

$$\frac{D}{\cos \varepsilon_2 (\cos \beta_1 - \sin \beta_1 \operatorname{ctg} \beta_2)} = r \quad (1.5)$$

## 1.5 Висновки по розділу

В розділі було розглянуто:

- Технічні характеристики деяких БПЛА
- Акустичні характеристики БПЛА з різною кількістю двигунів
- Методи акустичного пеленгування
- Топографічні методи виявлення координат

По результатам аналізу інформаційних джерел було встановлено що випромінювання більшості розглянутих БПЛА є шумовим процесом з наступними параметрами:

- Смуга частот звукового випромінювання - (125-2000)Гц.
- Рівень випромінювання - (60-80)дБ.

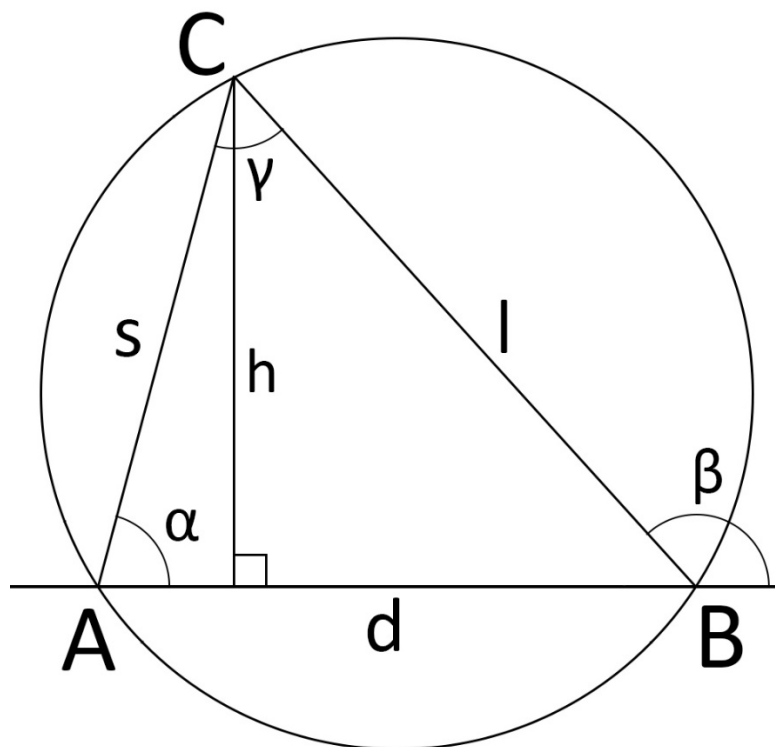
Метою наступного розділу є побудова акустичної системи для виявлення БПЛА завдяки тріангуляційному методу пеленгування та кореляційному пеленгатору.

## РОЗДІЛ 2. РОЗРАХУНКОВА ЧАСТИНА

### 2.1. Опис методу локалізації БПЛА

Схема заснована на двох кореляційних приймачах, котрі рознесені на відстань  $D$  один від одного, отримані результати обробляються з допомогою триангуляційного методу рис. 2.1.

- Точки  $A$  і  $B$  містять в собі однакові кореляційні пеленгатори.
- Приймачі рознесені на відстань  $d$  один від одного. Для достовірності роботи триангуляційного методу, ця відстань повинна становити 30-50 м.
- Кути  $\alpha$  та  $\beta$  – це кути, шукані кореляційними приймачами.
- Точка перетину  $C$  – місце перетину променів випущених під кутами, згідно до приймальних точок.



### Рис. 2.1. Принципіальна схема

Оскільки в комплексах пасивної локації, котрі використовують триангуляційний метод, на приймальних пунктах визначаються кутові координати активних завад, то через кожен кутову координату, вимірювану в приймальному пункті, можна провести пряму – тоді точкою перетину буде місце можливого положення цілі. Але для визначення точки положення цілі в просторі необхідна третя координата, її можна знайти розмістивши точно такі ж два кореляційних приймача вертикально.

З розв'язком поставленої задачі нам допоможе шкільний курс геометрії. На рисунку 2.2.  $\angle\beta = \angle\alpha + \angle\gamma$  і записавши висновок з теореми синусів  $\frac{d}{\sin(\gamma)} = \frac{l}{\sin(\alpha)}$  можна з першої формули виділити значення  $\angle\gamma$  і підставити в другу формулу. В результаті ми отримуємо формулу для знаходження відстані до об'єкту, який знаходиться в точці С:

$$\frac{d}{\sin(\beta-\alpha)} = \frac{l}{\sin(\alpha)} \rightarrow l = \frac{d \cdot \sin(\alpha)}{\sin(\beta-\alpha)} \quad (2.1)$$

де  $d$  – відстань між приймачами, а  $l$  – це відстань до цілі.

Але якщо нам потрібна пряма (найкоротша) відстань до бази приймачів, то ми можемо опустити висоту на сторону  $d$  та скориставшись вже знайденими параметрами трикутника знайти шукану відстань  $h$ :

$$h_d = l \cdot \sin(180^\circ - \beta) \quad (2.2)$$

Для визначення відстані по (2.1) треба мати кути (пеленги)  $\alpha$  та  $\beta$ . Для їх визначення використаємо метод кореляційного пеленгування.

## 2.2. Застосування кореляційного методу пеленгування

Постановку задачі пеленгування з поправкою на те, що звукове випромінювання можна вважати як широкосмуговим випадковим процесом з деяким енергетичним спектром[18] можна поділити на наступні частини:

- Детектування сигналу цілі в прийнятому акустичному сигналі з заданими ймовірностями виявлення і врахуванням можливості хибного виявлення;
- Розрахунок кута приходу хвиль (КПХ), для випромінювання, що надходить від БПЛА.

Для вирішення цих задач буде використаний кореляційний пеленгатор (КП), схема на рис. 2.2.

Два мікрофони розташовані на відстані  $d$  один від одного, на них падає акустична хвиля  $s(t)$  під кутом  $\alpha$ . Також на мікрофони діють акустичні завади  $n(t)$  і  $m(t)$ .

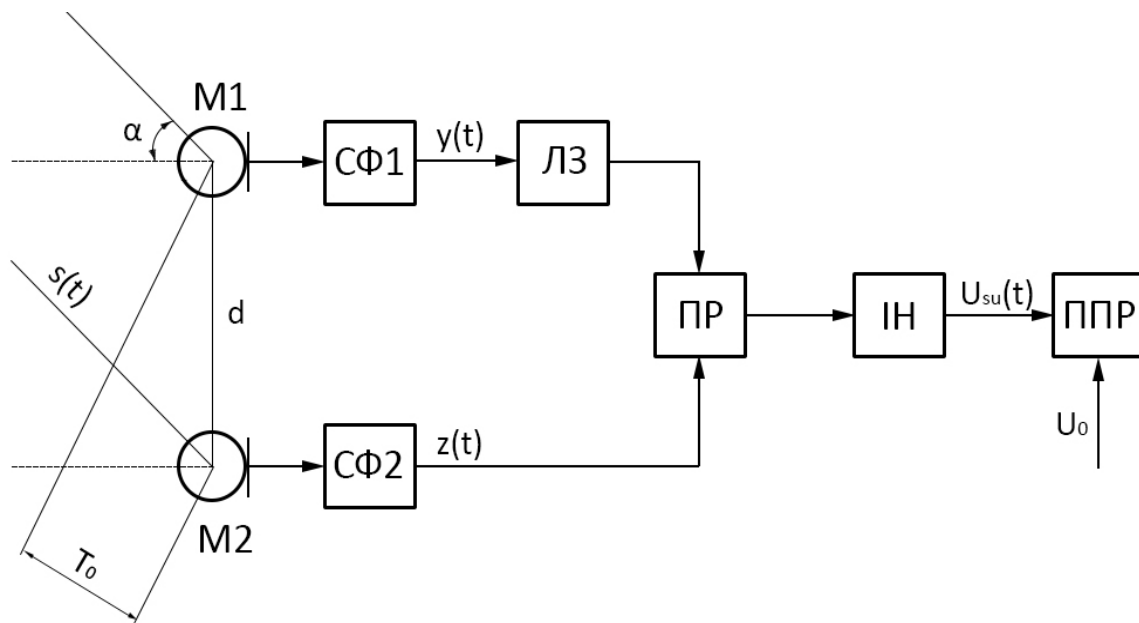


Рис. 2.2. Принципова схема кореляційного пеленгатора

Процеси  $y(t)$  та  $z(t)$  на входах мікрофонів записуються як:

$$y(t) = s(t) + n(t) \quad (2.3)$$

$$z(t) = s(t - \tau_0) + m(t) \quad (2.4)$$

$\tau_0$  – це відносна часова затримка, яку можна знати по максимуму взаємної кореляційної функції (ВКФ)  $R_{yz}(\tau)$  між прийнятими хвилями на часовому проміжку  $T$ :

$$R_{yz}(\tau) = \frac{1}{T} \int_0^T [s(t) + n(t)][s(t - \tau_0 + \tau) + m(t + \tau)] dt = \quad (2.5)$$

$$= R_{ss}(t - \tau_0) + R_{sm}(\tau) + R_{ns}(t - \tau_0) + R_{nm}(\tau)$$

де  $R_{ss}(\tau - \tau_0)$  – кореляційна функція (КФ) вхідного сигналу із затримкою  $\tau_0$ .  $R_{sm}(\tau)$ ,  $R_{ns}(\tau - \tau_0)$ ,  $R_{nm}(\tau)$  – ВКФ процесів, діючих на входи приймачів.

Кореляційна функція шумового сигналу визначається за формулою:

$$R_{ss}(\tau - \tau_0) = \sigma_s^2 \frac{\sin(2\pi\Delta f(\tau - \tau_0))}{2\pi\Delta f(\tau - \tau_0)} = \cos(2\pi f_0(\tau - \tau_0)) \quad (2.6)$$

де  $\sigma_s^2 = N_s \Delta f$ , в цій формулі  $N_s$  є спектральною густиною потужності шумового сигналу.  $f_0$  – центральна частота,  $\Delta f$  – ефективна смуга спектру випромінювання.

Опишемо відповідальні блоки пристрою та їх призначення:

1. Звукові сигнали на входах мікрофонів (М1, М2) перетворюються в електричні і надходять до смугових фільтрів (СФ1, СФ2), котрі налаштовані на інформативний район спектру випромінювання малих літальних апаратів.
2. На виході СФ  $y(t)$  та  $z(t)$  розглядаються як стаціонарні нормальні процеси з дисперсіями завад і нульовим математичним очікуванням сигналу та їх суміші:  
 $\sigma_n^2 = \sigma_m^2$ ,  $\sigma_s^2$ ,  $\sigma_{sn}^2 = \sigma_{sm}^2$ .
3. Перший процес, після проходження по ланцюгу затримки (ЛЗ), іде на вхід перемножувача (ПР). На інший вхід ПР надходить другий процес. Результат множення переходить в інтегратору (ІН).
4. На вході інтегратора формуються низькочастотна напруга  $u_{sn}(T)$  при присутності сигналу на вході і  $u_n(T)$  при його відсутності.
5. Рішення про присутність сигналу виконується за умовою  $u_{sn}(T) \geq U_0$  і проходить в пристрої прийняття рішень (ППР).

6. Значення  $U_0$  розраховується згідно до заданого значення ймовірності хибного спрацювання  $F$  та середньоквадратичного значення  $U_\sigma$  напруги  $u_{sn}(t)$  на виході інтегратора

$$U_0 = U_\sigma \cdot \Phi^{-1}(1 - F) \quad (2.7)$$

де  $\Phi^{-1}(l)$  – це функція, котра має значення обернене до інтегралу ймовірностей.

Через зміну часу затримки в ЛЗ можна знайти максимум вихідної напруги  $u_{sn}(t)$ , далі визначається  $\tau_0$  і розраховується КПХ:

$$\alpha = \arcsin \frac{\tau_0 c}{d} \quad (2.8)$$

де  $c$  – швидкість звуку в повітрі.

Ймовірність виявлення для КП розраховується як функція відношення дисперсії сигналу до дисперсії завади:

$$q_1^2 = \frac{\sigma_s^2}{\sigma_n^2} = \frac{\sigma_s^2}{\sigma_n^2} \quad (2.9)$$

На виході СФ зі смугою частот пропускання, яка дорівнює ефективній смузі сигналу.

## 2.3 Комп'ютерне моделювання кореляційного пеленгатора

В середовищі Simulink було побудовано імітаційну модель (ІМ) КП рис. 2.3.

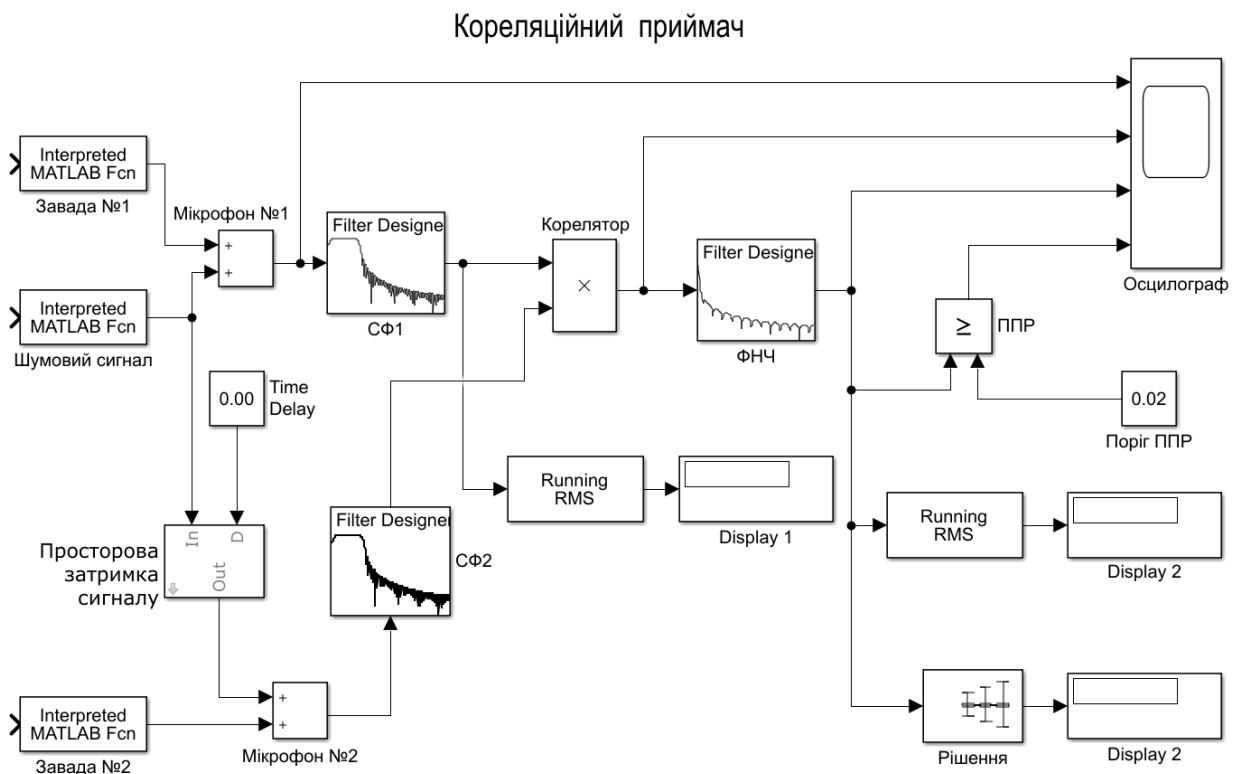


Рис. 2.3. Комп'ютерна модель кореляційного приймача

Опис функціонування ІМ приймача:

1. На обидва мікрофони надходить шумовий сигнал БПЛА та завада, але до другого мікрофону шумовий сигнал надходить з врахуванням просторової затримки.
2. Для кожного з мікрофонів створено окремий блок, який імітує заваду. Завади статистично незалежні.
3. З мікрофонів сигнали надходять до «Смугових фільтрів».



4. В блоках «СФ» витравлюють діапазон пропускання який дорівнює смузі частот випромінювання БПЛА.
5. Відфільтровані сигнали з смугових фільтрів прямують на вхід «Корелятора», який складається з перемножувача та «ФНЧ».
6. З «ФНЧ» формується низькочастотний процес  $u_{sn}(T)$  та  $u_n(T)$  для ситуації присутності і відсутності сигналу на вході приймача.
7. Результат обробки «ФНЧ». подається на блок пристрою прийняття рішень (ППР) де порівнюється з  $U_0$  (2.5) .
8. Порогове значення  $U_0$  в блоці «ППР» задається в блоці «Поріг ППР». При присутності сигналу, котрий визначається умовою  $u_{sn}(T) \geq U_0$  на виході блоку отримуємо «1».
9. Осцилограми сигналу можна побачити на віртуальному осцилографі, до якого надходять дані з різних блоків схеми рис. 2.4.

## 2.4. Модельний експеримент

Налаштуємо параметри блоків кореляційного пеленгатора згідно до умов задачі. Встановимо смугу частот пропускання «СФ»  $\Delta f = 2000 \text{ Гц} - 125 \text{ Гц} = 1875 \text{ Гц}$  , частота зрізу «ФНЧ» дорівнює 10 Гц.

Задавши параметр виявлення  $q_1^2 = (U_s/U_n)^2 = 0.2$  були розраховані параметри блоків «Завада» і «Шумовий сигнал» -  $U_n = 1$  та  $U_s = 0.45$  відповідно.

$$\begin{aligned} U_{CF} &= U \sqrt{\Delta f / f_B} \dots de \dots f_B = 0.5 f_d; f_d = \text{частота} \dots \text{дискрет}; \\ U_{ФНЧ} &= U^2 \Delta f / f_B \end{aligned} \quad (2.9)$$

Проведемо модельний експеримент спочатку тільки для завади встановивши параметри блоків «Завада» і «Шумовий сигнал» -  $U_n = 1$ ;  $U_s = 0$  відповідно. Визначаємо по віртуальним приладам ефективні значення напруг після блоків СФ та ФНЧ. Встановити значення для блоку «Поріг ППР»  $U_0 = (1 +$

$q_1^2)U_{пФНЧ}$ . Провести експеримент на хибні спрацювання методом простої випадкової вибірки. Суть методу – це проведення прогонів моделі до тих пір, поки по кожному з рівнів діючих факторів не буде отримана необхідна точність. З допомогою приладу «RMS» знаходимо  $U_{пФНЧ} = 0.075$  тоді знайдемо поріг  $U_0 = (1 + q_1^2)U_{пФНЧ}$  для різних значень  $q_1^2$ . Наприклад для  $q_1^2 = 0.7$   $U_0 = (1 + q_1^2)U_{пФНЧ} = 0.13$

Встановимо в «Поріг ППР»  $U_0 = 0.13$  та проведемо експеримент на хибні спрацювання методом простої випадкової вибірки. Приклад одного з експериментів приведено на рис. 2.4. На рисунку вищезгаданої осцилограми, видно, що спрацювання відсутні при розрахованому рівні  $U_0$ .

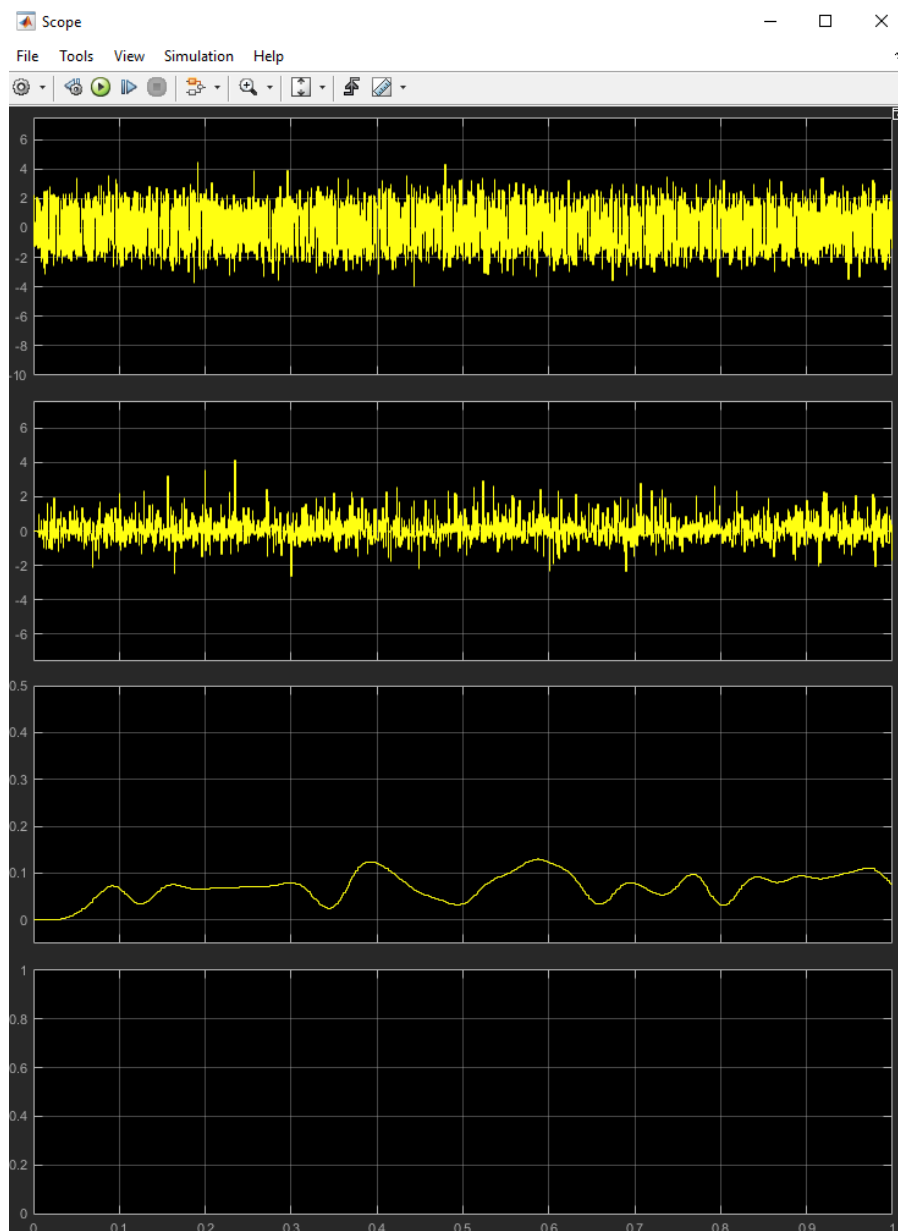


Рис. 2.4. Осцилограми моделювання на хибні спрацювання

Моделювання роботи КП для суміші завади та сигналу. Змінюючи параметр виявлення в межах  $q_1^2 = 0.2, 0.4, 0.7$  та встановивши параметри блоків «Завада» і «Шумовий сигнал» -  $U_n = 1$ ;  $U_s = 0.45, 0.65$  та  $0.85$  відповідно. Встановимо в блоці «Поріг ППР» значення  $U_0 = 0.13$ .

Результуючі діаграми говорять, що в експериментах на виявлення стосовно саме рівня сигнал-завада величиною  $0.85$  проявляється висока достовірність виявлення див. рис. 2.5. Серії експериментів з нижчим рівнем сигнал-завада, відповідно, показують гірші результати. Зокрема, якщо при рівні  $0.85$  ми маємо приблизно 85% виявлення, то при  $0.65$  біля 50% і при  $0.45$  приблизно 5%.

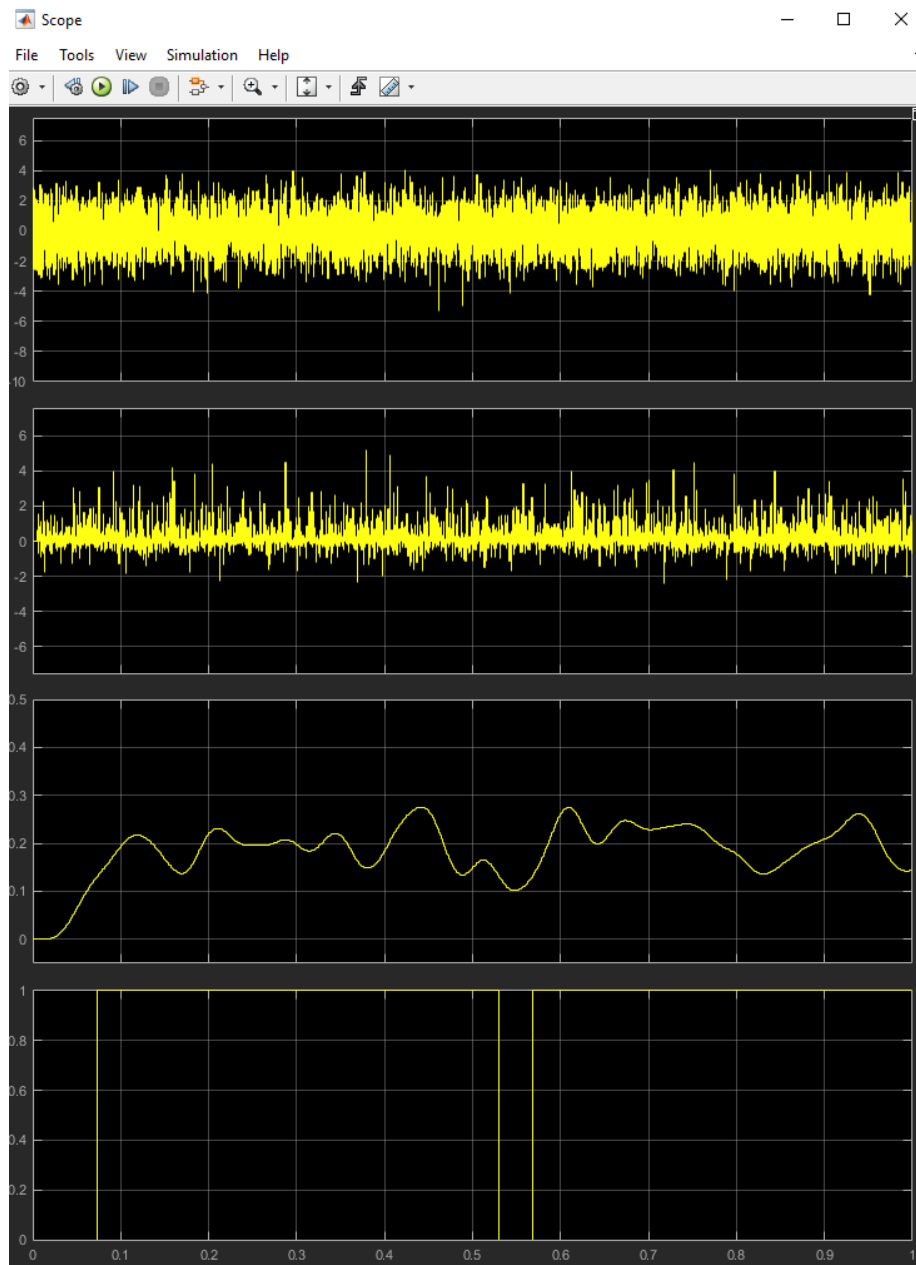


Рис. 2.5. Виявлення шуму при рівні сигнал-завада 0.85

## 2.5. Висновки по розділу

В ході роботи у було проведено:

1. Опис схеми побудови та визначення координат тріангуляційним методом
2. Для визначення пеленгів на шумовий об'єкт запропоновано кореляційний метод. Розглянуто алгоритм пеленгування, визначено модель інформаційного сигналу – «білий» шум в смузі частот (125-2000) Гц. Модель завади також – «білий» шум.
3. Встановлено правило прийняття рішення

4. Комп'ютерне моделювання кореляційного пеленгатора та дослідження виявлення шумових сигналів, на смузі частот яка відповідала смузі випромінювання БПЛА, замаскованих певною завадою. Модель побудована у програмному середовищі Simulink, з використанням віртуальних імітаційних блоків його бібліотек. В результаті дослідів виявлено надійне виявлення шумового сигналу при відношенні сигнал-завада = 0.7 для наступних налаштувань параметрів кореляційного пеленгатора:

- Смуга частот СФ (125-2000) Гц.
- Зріз ФНЧ 10 Гц.
- Поріг компаратора  $U_0 = 0.13$ .

## ВИСНОВКИ

1. Був проведений аналітичний огляд проблеми виявлення та локалізації БПЛА.
2. Проведено огляд акустичних та технічних характеристик БПЛА, а також засобів для їх знаходження.
3. Розглянуто топографічні методи визначення координат об'єкта. Для вирішення задачі запропоновано застосувати тріангуляційний метод - по двом кутам і відстані між приймачами.
4. Для визначення кутових координат (пеленгів) запропоновано використати кореляційний пеленгатор. Дано теоретичне обґрунтування способу та описано принципи дії кореляційного пеленгатора по структурній схемі.
5. В програмному пакеті Simulink, була синтезована імітаційна модель КП, описані функції та налаштування блоків ІМ.
6. Проведено модельний експеримент по виявленню «шумового сигналу БПЛА». Для уточнених налаштувань «СФ» та «ФНЧ» отримано параметр сигнал-завада = 0.7, для якого виявлення становить 85%

## ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. THE UK APPROACH TO UNMANNED AIRCRAFT SYSTEMS. JOINT DOCTRINE NOTE 2/11, p. 2-1

<https://www.law.upenn.edu/live/files/3890-uk-ministry-of-defense-joint-doctrine-note-211-the>

2. Каршов Р.С. / Класифікація малих літальних апаратів

<https://cyberleninka.ru/article/n/klassifikatsiya-bespilotnyh-letatelnyh-apparatov/viewer>

3. «Укроборонпром» готовий повністю закрити потреби ЗСУ в мінібезпілотноках 5 канал. 04 січня 2017.

<https://ukroboronprom.com.ua/uk/media/ukroboronprom-gotovyj-povnistyu-zakryty-potreby-zsu-v-minibezpilotnykah.html>

4. Представлено модернізований БПАК «Spectator-M1». Ukrainian Military Pages.

<https://www.ukrmilitary.com/2018/11/spectator-m1.html>

5. Jeremiah Gertler US unmanned aerial systems 6 лютого 2012 у Wayback Machine. (3.01.2012). — С.45

<https://web.archive.org/web/20120206133540/http://lignesdedefense.blogs.ouest-france.fr/files/unmanned%20aerial%20systems%20CRS.pdf>

6. Popper, Ben. DJI's new Mavic Pro drone folds up and fits in the palm of your hand. *The Verge*. The Verge. 8 October 2016.

<https://www.theverge.com/2016/9/27/13058722/dji-mavic-pro-drone-foldable-4k-gesture-control>

7. Cabell R., Grosveld F. and McSwain R. (2016) Measured Noise from Small Unmanned Aerial Vehicles

<https://ntrs.nasa.gov/search.jsp?R=20160010139>

8. Козерук С.О. Виявлення малих літальних апаратів за акустичним випромінюванням / С.О. Козерук, О.В. Коржик // Вісник НТУУ "КПІ". Серія Радіотехніка, Радіоапаратобудування. – 2019. – №. 76. – С. 15-20.

<https://ela.kpi.ua/handle/123456789/30388>

9. «Dronebouncer» site. Orelia drone-detector

<http://dronebouncer.com/en/orelia-drone-detector>

10. «Droneshield» site. Drone Sentry product

<https://www.droneshield.com/sentry>

11. В.Н. Тяпкин, А.Н. Фомин, Е.Н. Гарин, Ю.Л. Фатеев, В.П. Бердышев, А.А. Наговицын, А.В. Темеров, В.Г. Сомов, И.В. Лютиков. ОСНОВЫ ПОСТРОЕНИЯ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СТАНЦИЙ РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ ВОЙСК. с. 64-66